

УДК 629.735.33.023.8:620.193

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.05

Є. П. ГАВРИЛОВ¹, С. Р. ІГНАТОВИЧ², М. В. КАРУСКЕВИЧ²,
Т. П. МАСЛАК², О. М. КАРУСКЕВИЧ²

¹ Акціонерне товариство «АНТОНОВ», Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПЛІВКОУТВОРЮЮЧИХ АНТИКОРОЗІЙНИХ СПОЛУК ДЛЯ ЗАХИСТУ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВІД КОРОЗІЇ

Представлено експериментально обґрунтований підхід до вибору плівкоутворюючих антикорозійних сполук для захисту авіаційних конструкцій від корозії. Досліджено вплив антикорозійних сполук на ресурс втому типових заклепкових з'єднань конструкції фюзеляжу літаків транспортної категорії. Встановлено, що антикорозійні сполуки проникають в зазори з'єднань і при певних умовах впливають на втому довговічність. У зв'язку з гіпотезою про вплив сил тертя між елементами з'єднань на їх втомне пошкодження і руйнування, розроблено пристрій, який дозволяє кількісно визначити сили тертя спокою між елементами з'єднань при наявності в зазорі з'єднання антикорозійних сполук. Проведено експериментальне дослідження впливу сучасних розповсюджених в авіації плівкоутворюючих сполук на сили тертя. Проведено скінченно-елементний аналіз впливу плівкоутворюючих сполук в зазорі з'єднань на напружено-деформований стан елементів з'єднань. Узагальнено результати дослідження негативних побічних ефектів застосування антикорозійних сполук. Дослідження довговічності заклепкових з'єднань після їх обробки антикорозійними сполуками, скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану та визначення впливу на сили тертя розглядаються як основні компоненти комплексного методу контролю плівкоутворюючих антикорозійних сполук. Сформульовано також додаткові компоненти комплексного методу дослідження плівкоутворюючих антикорозійних сполук, які розширюють кількість характеристик плівкоутворюючих антикорозійних сполук. До додаткових компонентів комплексного методу відносяться: визначення впливу антикорозійних сполук на інкубаційну стадію втомного пошкодження, що доцільно контролювати по показниках деформаційного рельєфу поверхні; дослідження впливу антикорозійних сполук на стадію розповсюдження втомних тріщин з застосуванням підходів лінійної механіки руйнування; визначення проникнення антикорозійних сполук в зазори з'єднання при дії вторинного згину елементів з'єднань. Запропоновано структурно-логічну схему комплексного методу оцінки негативних побічних ефектів застосування плівкоутворюючих антикорозійних сполук.

Ключові слова: корозія; авіаційні конструкції; ресурс; заклепкові з'єднання; тертя; коефіцієнт тертя; контактні напруження; антикорозійний захист; побічні ефекти.

Вступ

Необхідність захисту авіаційних конструкцій від корозії обумовлена неможливістю радикального вирішення проблеми корозії металевих конструкцій. Незважаючи на удосконалення конструкційних сплавів і системи їх захисту від корозії, дослідження технічного стану конструкцій повітряних суден виявляють значні корозійні пошкодження різноманітного характеру: рівномірну поверхневу корозію, міжкристалічну корозію, пігментову корозію, розшаровуючу корозію, щільову корозію.

Додатковим засобом антикорозійного захисту є використання плівкоутворюючих антикорозійних сполук (ПАС). Серед значного спектру антикорозійних сполук особливий інтерес являють продукти фірми ARDROX – саме ці антикорозійні матеріали прийняті для використання в Україні в теперішній час [1-3].

Захисні властивості ПАС доведені їх дослідженнями та досвідом їх використання. В той же час існують і експериментальні дослідження, які вказують на необхідність обережного використання ПАС, особливо тих, характеристики яких досліджені недостатньо [4, 5]. Дослідження, спрямовані на розробку комплексного підходу до вибору плівкоутворюючих антикорозійних сполук для захисту авіаційних конструкцій від корозії проводяться в Національному авіаційному університеті [6] в кооперації з АТ «АНТОНОВ».

Основні компоненти методу

Основними (обов'язковими) компонентами комплексного методу контролю побічних негативних ефектів при застосуванні профілактичних антикорозійних покриттів є компоненти, критичні з точки

зору впливу на ресурсні характеристики авіаційних конструкцій. До обов'язкових компонентів відносяться: а) експериментальне дослідження впливу плівки утворюючих захисних сполук на сили тертя в заклепкових з'єднаннях; б) моделювання роботи заклепкового з'єднання в присутності ПАС; в) перевірка впливу ПАС на довговічність заклепкових з'єднань, які застосовуються в сучасних і перспективних літаках транспортної категорії.

1.1. Експериментальна оцінка впливу ПАС на сили тертя між елементами заклепкових з'єднань

Проведені експериментальні дослідження показали, що необхідною і інформативною складовою комплексного методу контролю побічних негативних ефектів при застосуванні ПАС є оцінка їх впливу на сили тертя і перерозподіл зусиль між елементами з'єднання. Для заклепкових швів взаємне переміщення елементів з'єднання мінімізовано, отже особливий практичний інтерес має визначення коефіцієнту тертя спокою.

В'язкість, дані про яку наведені в переліку технічних характеристик ПАС, корелює з проникаючою здатністю сполук і змашувальною дією, але не відображає повністю комплекс властивостей, які повинні бути враховані при виборі ПАС. Ще одним показником є так звана маслянистість, яка оцінюється за коефіцієнтом тертя – вище значення маслянистості відповідає меншому коефіцієнту тертя.

Для дослідження тертя в заклепкових з'єднаннях і визначення відповідних значень коефіцієнтів тертя спокою рекомендовано використання пристрою [7], розробленого, виготовленого і апробованого в ході виконання досліджень, які проводяться сумісно Національним авіаційним університетом і АТ «АНТОНОВ».

При дослідженні сил статичного тертя в заклепковому з'єднанні необхідно враховувати різноманітні технологічні фактори, зокрема: Вплив кількості ПАС в зазорі з'єднання на силу тертя; вплив інтервалу часу між нанесенням покриття і навантаженням; відповідність сил стискання рухомого конструктивного елемента (імітаційного з'єднання) і елементів реального заклепкового з'єднання, що потребує відповідного аналізу.

Висновок щодо факторів впливу на силу тертя в з'єднанні, отриманий в результаті експериментального дослідження з використанням запропонованого пристрою, дозволяє оптимізувати вибір ПАС і технологію нанесення.

1.2. Скінченно - елементний аналіз перерозподілу зусиль між елементами заклепкового з'єднання при наявності плівкоутворюючої сполуки

Отримані експериментальні значення коефіцієнтів статичного тертя є вхідними параметрами скінченно - елементного моделювання роботи заклепкових з'єднань в присутності ПАС і визначення їх впливу на силу тертя в з'єднанні.

Виявлений локалізований характер контактних напружень унеможливило ефективне використання методу тензометрії для дослідження впливу ПАС на перерозподіл напружень в елементах з'єднання.

Дослідження зони контакту та контактного тиску в з'єднанні дозволило виконати кількісну оцінку розподілу контактного тиску в радіальному напрямку, яке залежить від зусилля стиснення (рис. 1).

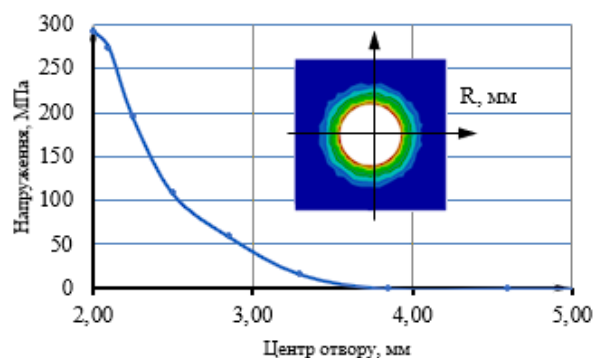


Рис. 1. Залежність контактної напруженості від відстані до центру отвору

Скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану заклепкових з'єднань в присутності ПАС показав можливість визначення зв'язку між значеннями коефіцієнтів статичного тертя в з'єднанні, стискаючими зусиллями заклепки і напруженнями в зоні формування втомної тріщини.

1.3. Контроль впливу ПАС на довговічність заклепкових з'єднань, які застосовуються в сучасних і перспективних літаках транспортної категорії

Контроль впливу ПАС на довговічність заклепкових з'єднань є заключним основним компонентом методології контролю побічних негативних ефектів при застосуванні профілактичних антикорозійних покриттів. Умовою для впливу ПАС на втомну довговічність є їх проникнення в зазор з'єднання і вплив на сили тертя (рис. 2).



Рис. 2. Внутрішні поверхні заклепкових з'єднань з ділянками проникнення сполуку AV-8

На сьогодні накопичено експериментальні дані стосовно впливу на втому антикорозійних сполук AV-8; AV-25; AV-30.

При реалізації комплексного методу контролю побічних негативних ефектів обумовлених застосуванням ПАС основна увага приділяється безпосередньо впливу ПАС на довговічність заклепкових з'єднань, визначенню ПАС, які не викликають, або викликають мінімальний побічний ефект їх застосування, можливості попередження негативного впливу за рахунок оптимізації технології нанесення ПАС.

При визначенні режимів навантажування при проведенні контрольних випробувань слід враховувати дані про вплив рівня циклічних напружень на побічний ефект застосування ПАС. Так, наприклад, в роботі [8] було показано, що побічний ефект не спостерігався при напруженнях, які відповідали довговічностям більше, ніж 5×10^5 циклів навантажування. Отже, зазначена обов'язкова складова комплексного методу повинна містити реалістичний спектр режимів навантажування. Прикладом виявленого ефекту є більш ніж двократне зниження довговічності заклепкових з'єднань при використанні ПАС AV-8 і ПАС AV-25 в порівнянні з конструктивними елементами без антикорозійної обробки і відсутність негативного ефекту при покритті AV-30.

Слід зауважити, що такий результат спостерігався при так званій «надлишковій» кількості ПАС і не спостерігався, при «помірній» кількості ПАС в області з'єднання.

Очевидно, що особливості конструкції і технології виготовлення заклепкових з'єднань також є факторами, які повинні бути розглянуті при прийнятті рішення стосовно антикорозійної обробки ПАС.

2. Рекомендовані додаткові компоненти оцінки можливих побічних ефектів

Рекомендовані додаткові компоненти оцінки можливих побічних ефектів основані на аналізі

проведених в АТ Антонов і на кафедрі конструкції літальних апаратів НАУ досліджень, які створюють передумови до подальшого розширення кількості компонентів методології контролю побічних негативних ефектів при застосуванні плівкоутворюючих антикорозійних сполук.

2.1. Вплив на інкубаційну стадію втоми

Підставою для включення в комплексний метод контролю побічних негативних ефектів при застосуванні ПАС зазначеного додаткового дослідження є припущення про певні властивості ПАС, які можуть віднести ці сполуки до поверхнево активних речовин (ПАР), тобто таких, які впливають на деформаційне пошкодження поверхневого шару металу шляхом реалізації ефекту Ребіндера [9]. Вплив ПАР на міцність металів вперше виявив Ребіндер в 1928 році, а після цього ефект було знайдено багатьма іншими дослідниками. Зазначений ефект не є корозійним впливом. Адсорбція ПАР полегшує деформацію і руйнування металів навіть в більшій мірі, ніж при хімічній взаємодії. Адсорбційне полегшення деформації знижує поверхневу енергію металу і таким чином сприяє пластичному зсуву [10].

Незважаючи на багаторічні дослідження ефекту Ребіндера, висновки стосовно впливу ПАР на втомну довговічність металів не є однозначними. Так, в роботі [10] було показано, що змащувальні матеріали та інші поверхнево-активні середовища призводять до зниження границі втоми на 7-26% в порівнянні з довговічністю в повітряному середовищі. Це пояснюється адсорбцією ПАР, які містяться в змащувальному матеріалі і відповідним зниженням поверхневої енергії. В той же час, в роботі [11] вказано, що причиною зниження довговічності можуть бути інші фактори, наприклад: концентрація ПАР, властивості металу в контакті з ПАР.

Висновки, стосовно впливу ПАР на втому металів ще потребують пояснення, втім, враховуючи високі вимоги до надійності та довговічності авіаційних конструкцій це явище не можна ігнорувати при дослідженні функціональних властивостей ПАС.

Аналіз досліджень інкубаційної стадії втоми вказує на доцільність використання запропонованого в роботах [12] параметру пошкодження для порівняльного аналізу процесу втоми в умовах дії антикорозійних сполук та їх відсутності.

Параметр пошкодження відображає процес накопичення втомного пошкодження на мезо-масштабному рівні, тобто в об'ємах, співрозмірних з розміром зерна алюмінієвого сплаву, який знаходиться в діапазоні 0,01-0,1 мм. Параметр пошкодження визначається по насиченості так званого деформаційного рельєфу поверхні, який є сукупністю екструзій,

інтрузій та смуг ковзання, що формуються на поверхні багатьох чистих металів та сплавів в результаті дії циклічного навантажування (рис. 3). Саме ці структурні складові деформаційного рельєфу є чутливими до дії ПАР. Численними експериментами, проведеними в НАУ було доведено, що деформаційний рельєф можна спостерігати і кількісно оцінювати на поверхні плакованих алюмінієвих сплавів, до яких відноситься і ті, що використовується для виготовлення обшивки фюзеляжу транспортних літаків.

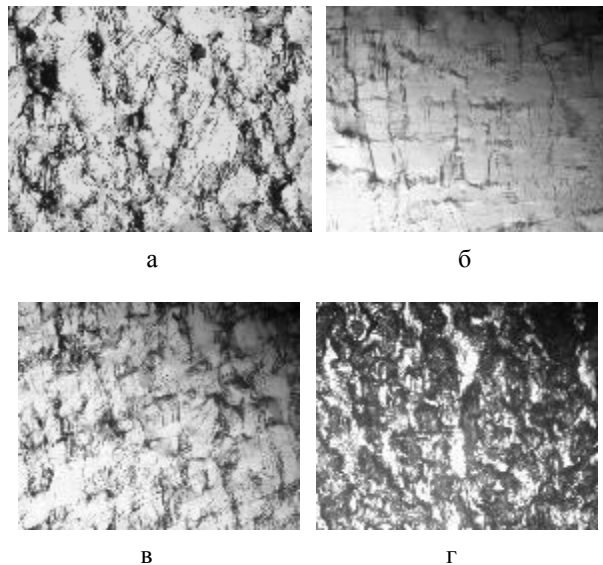


Рис. 3. Деформаційний рельєф поверхні після 5000 циклів навантажування при збільшенні $250\times$
а - розтягом-стиском; б - крученням; в - синхронним комбінованим розтягом-стиском і крученням; г - асинхронним розтягом-стиском і крученням

Моніторинг деформаційного рельєфу проводиться засобами комп'ютеризованої оптичної мікроскопії з визначенням запропонованого двовимірного параметру пошкодження. Аналіз впливу ПАС на деформаційну пошкоджуваність доцільно проводити як при дослідженні заклепкових з'єднань, так і одночасно з дослідженням кінетики втомних тріщин на стадії її зародження.

2.2. Вплив на кінетику втомних тріщин

Методика дослідження процесу руйнування алюмінієвих конструкційних сплавів була розроблена в АТ «АНТОНОВ». З певними уточненнями вона може бути використана при реалізації представленого комплексного методу.

При дослідженні впливу антикорозійних сполук на кінетику втомних тріщин доцільно використовувати ПАС та еталонний матеріал - олеїнову кислоту, яка вважається типовою ПАР. Олеїнова кислота використовувалася в дослідженнях впливу поверхнево-

активних речовин в фундаментальних дослідженнях, в роботі [13].

Олеїнова кислота (9Z)-Октадецена кислота $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ – мононенасичена жирна кислота. Міститься в рослинних жирах та оліях. Не має кольору та запаху. Температура плавлення - $13,4^\circ\text{C}$ $16,3^\circ\text{C}$. Температура кипіння 286°C .

Зразки для оцінки швидкості росту втомної тріщини виготовляються з матеріалу, який використовується для виготовлення елементів конструкції, що потребують антикорозійного захисту. Товщина зразка визначається товщиною напівфабрикату, верхня та нижня поверхні не підлягають додатковій механічній обробці. Габаритні розміри зразка $600 \times 200 \times 1,5$ мм. Центральна тріщина вишита з початкового концентратора (рис. 4).

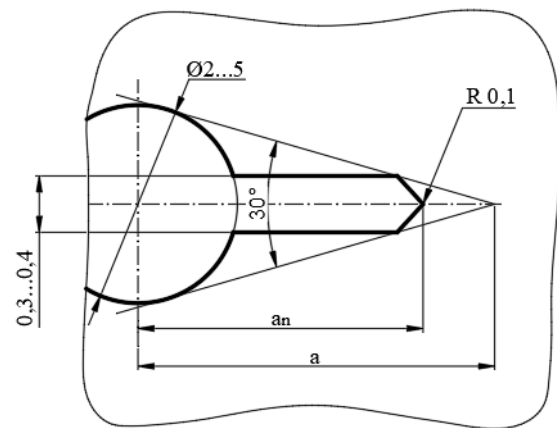


Рис. 4. Форма концентратору напружень зразку для дослідження швидкості росту втомних тріщин

Процедура випробувань повинна відповідати загальноприйнятим вимогам механіки руйнування. Надрізи виконуються електроіскровим або механічним способом, вершини надрізів загострюються лезом. На кінцях надрізів шляхом прикладання циклічного навантаження вирощуються втомні тріщини. Для спостереження за вершиною тріщини та зоною пластичності, що її оточує, проводиться полірування ділянки зразка вздовж лінії росту тріщини. Нанесення ПАС доцільно виконувати після формування втомної тріщини – таким чином забезпечується максимальний ефект застосування сполук.

2.3. Вторинний згин при циклічному навантажуванні в умовах дії антикорозійних покриттів

При проведенні лабораторних досліджень впливу ПАС на втомну довговічність необхідним є урахування критично важливих ефектів і факторів. Одним із таких є вторинний згин [14, 15], що виникає

при навантажуванні заклепкових та болтових з'єднань. Схема цього явища показана на рис. 5. Величина вторинного згину достатньо значна для впливу на циклічну довговічність з'єднань.

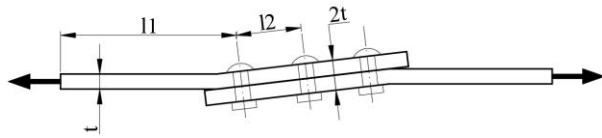


Рис. 5. Схема виникнення вторинного згину елементів заклепкового з'єднання [17]

В роботі [16] показані шляхи зменшення вторинного згину. Для кількісної оцінки вторинного згину використовується коефіцієнт вторинного згину, який залежить від геометрії заклепкового з'єднання.

Спостереження за проникненням антикорозійних сполук при циклічному навантажуванні зразків заклепкових з'єднань, вказує на важливість зазначеного фактору. Очевидно, що зі збільшенням товщини листів обшивки величина вторинного згину збільшується, це сприяє збільшенню зазору між листами обшивки і, як наслідок, проникненню антикорозійних сполук у проміжок між листами обшивки. Це повинно бути враховано при проведенні експериментальних досліджень можливих побічних ефектів застосування плівко утворюючих захисних покриттів. Ексцентриситет навантажування пов'язаний з товщиною з'єднаних листів обшивки, отже експериментальне дослідження повинно проводитись на зразках, які відображають зазначені особливості конструкції.

3. Структурно-логічна схема комплексного методу контролю побічних негативних ефектів при застосуванні плівкоутворюючих антикорозійних сполук

В результаті досліджень втомних заклепкових з'єднань, оброблених ПАС, тертя між елементами з'єднань, вимірювань коефіцієнту статичного тертя в з'єднаннях, моделювання роботи з'єднань методом скінченних елементів, а також розгляду додаткових можливих факторів впливу ПАС на втому елементів авіаційних конструкцій, запропоновано метод контролю побічних негативних ефектів при застосуванні ПАС. Структурно логічна схема методу показана на рис. 6.



Рис. 6. Компоненти комплексного методу контролю побічних негативних ефектів при застосуванні ПАС

Висновки

Незважаючи на відомі доведені властивості ПАС захищати металеві конструкції від корозії, їх застосування в авіації потребує додаткових досліджень. Комплексний метод контролю побічних негативних ефектів при застосуванні плівкоутворюючих антикорозійних сполук в основному розроблено і апробовано. Метод стосується в першу чергу впливу ПАС на втому заклепкових з'єднань, який реалізується шляхом перерозподілу зусиль між елементами з'єднань внаслідок впливу ПАС на сили тертя в з'єднаннях.

Враховуючи вимоги принципу допустимого пошкодження доцільним є додаткове дослідження, спрямоване на визначення впливу ПАС на кінетику втомних тріщин в авіаційних конструкціях. Подальші дослідження властивостей ПАС передбачають також дослідження впливу ПАС на інкубаційну стадію втоми конструкційних матеріалів.

Внесок авторів: формулювання проблеми, методологія дослідження – Є. П. Гаврилов, М. В. Карусевич; методика дослідження втоми і тертя – С. Р. Ігнатович; методика дослідження інкубаційної стадії втоми – О. М. Карусевич, Т. П. Маслак.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Робота виконувалась за фінансової підтримки АТ «АНТОНОВ».

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку фахівцям АТ «АНТОНОВ» і Національного авіаційного університету за допомогу в проведенні експериментальних досліджень.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. 30690975/SDS_GEN_US/EN. Safety data sheet. Ardrex® AV8. [Effective from 2023-01-05] [Electronic resource] // Official edition: BASF Group. – 2023. – 11 p. – Available at: https://cdn11.bigcommerce.com/s-jify-kode7m/product_images/uploaded_images/msds/SGP98072.pdf. (accessed 12.6.2024).
2. 30690979/SDS_GEN_US/EN. Safety data sheet. Ardrex AV25 [Effective from 2012-11-22] [Electronic resource] // Official edition: BASF Group. – 2015. – 13 p. – Available at: [https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20\(1\).pdf](https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20(1).pdf). (accessed 12.6.2024).
3. 30690983/SDS_GEN_GB/EN. Safety data sheet. Ardrex AV30. [Effective from 2020-04-04] [Electronic resource] // Official edition: BASF Group. – 2020. – 17 p. – Available at: <https://www.fds.supavia.eu/ARDROX%20AV%2030%20FDS%20ENG.PDF>. (accessed 12.6.2024).
4. The influence of corrosion treatments on fatigue of aircraft structural joints [Text] / A. Jaya, U. H. Tiong, M. Reza, B. Cees, & C. Graham // 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 19–24 September 2010. - Nice, France. – 2010. – 8 p.
5. Effect on anticorrosion penetrant on the fatigue life in flight simulation tests of various riveted joints [Text] : National Aerospace Laboratory report TR 77103/1977. Amsterdam: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. – 1977. – P. 35. – Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:3936dd4e-7e77-4f76-9259-956359492bbc>. (accessed 12.6.2024).
6. Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints [Text] / Ie. Gavrylov, M. Karuskevich, S. Ignatovich [et al] // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2021. – Vol. 45, Iss. 3. – P. 938–941. DOI: 10.1111/ffe.13621.
7. Пат. 155484 Україна : МПК G01N19/02 Пристрій для визначення коефіцієнтів тертя спокою в авіаційних заклепкових з'єднаннях / Карускевич, М. В., Гаврилов, Є. П., Ігнатович, С. Р., Юцкевич, С. С., Маслак, Т. П. заявник і патентовласник Національний Авіаційний Університет – № u202204280 ; заявл. 11.11.2022; опубл. 06.03.2024, Бюл. № 10/2024. – 7 с. – Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1787270/#!>. – 12.6.2024.
8. Corrosion treatments and the fatigue of aerospace structural joints [Text] / A. Jaya, U. H. Tiong, R. Mohammed [et al] // Procedia Engineering. – 2010. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1523–1529. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.164.
9. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды [Текст] / П. А. Ребиндер. – М. : Наука. – 1978. – 384 с.
10. Карпенко, Г. В. Влияние активных жидких сред на выносливость стали [Текст] / Г. В. Карпенко. – К.: Изд-во АН УССР. – 1955. – 207 с.
11. Никольс, Х. Хрупкое разрушение стали в присутствии органических жидкостей. Чувствительность механических свойств к действию среды [Текст] / Х. Никольс, & У. Ростокер. – М. : Мир. – 1969. – С. 121–128.
12. Pejkowski, Ł. Extrusion/intrusion structure as a fatigue indicator for uniaxial and multiaxial loading [Text] / Ł. Pejkowski, M. Karuskevich, & T. Maslak // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2019. – Vol. 42, Iss. 10. – P. 2315–2324. DOI: 10.1111/ffe.13066.
13. Лихтман, В. И. Физико-химические явления при деформации металлов [Текст] / В. И. Лихтман // Успехи физических наук. – 1954. – Т. 54. – Вып. 4. – С. 587–618. DOI: 10.3367/ufnr.0054.195412d.0587.
14. Schijve, J. Fatigue of structures and secondary bending in structural elements. [Text] / J. Schijve, G. Campoli, & A. Monaco // International Journal of Fatigue. – 2009. – Vol. 31. – P. 1111–1123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.01.009.

15. Freed, Y. *Analytical and Numerical Investigation of the Effect of Secondary Bending in Hard-Point Joints* [Text] / Y. Freed, L. S. Machnes, & O. Magidish // *Proceedings of the 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue: ICAF 2019 – Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing*, 2-7 June 2019. – Krakow, Poland. – 2019. – P. 159-175. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_13.

References

1. 30690975/SDS_GEN_US/EN. *Safety data sheet. Ardrex® AV8*. [Effective from 2023-01-05]. Official edition: BASF Group, 2023. 11 p. Available at: https://cdn11.bigcommerce.com/s-jifykode7m/product_images/uploaded_images/msds/SGP98072.pdf. (accessed 12.6.2024).
2. 30690979/SDS_GEN_US/EN. *Safety data sheet. Ardrex® AV25*. [Effective from 2012-11-22]. Official edition: BASF Group, 2015. 13 p. Available at: [https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20\(1\).pdf](https://p11.secure.hostingprod.com/@site.skygeek.com/ssl/MSDS/chemetall-ardrex-av-25-corrosion-inhibiting-compound-5-gallon%20(1).pdf). (accessed 12.6.2024).
3. 30690983/SDS_GEN_GB/EN. *Safety data sheet. Ardrex® AV30*. [Effective from 2020-04-04]. Official edition: BASF Group, 2020. 17 p. Available at: <https://www.fds.supavia.eu/ARDROX%20AV%2030%20FDS%20ENG.PDF>.
4. Jaya, A., Tiong, U. H., Reza, M., Ceas, B., & Graham, C. The influence of corrosion treatments on fatigue of aircraft structural joints. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Nice, France. 2010. 8 p. Available at: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/PAPERS/354.PDF. (accessed 12.6.2024).
5. Schijve, J., Jacobs, F. A. & Tromp, P. J. *Effect on anticorrosion penetrant on the fatigue life in flight simulation tests of various riveted joints*: National Aerospace Laboratory report TR 77103/1977. Amsterdam: NLR, 1977. Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:3936dd4e-7e77-4f76-9259-956359492bbc>. (accessed 12.6.2024).
6. Gavrylov, I., Karuskevich, M., Ignatovich, S., Yutskevych, S., & Maslak, T. Influence of corrosion preventive compounds on the friction force in aircraft lap joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, vol. 45, iss. 3, pp. 938–941. DOI: 10.1111/ffe.13621.
7. Karuskevich, M., Gavrylov, I., Ignatovich, S., Yutskevych, S., & Maslak, T. *Prystrii dlia vyznachennia koefitsientiv tertia spokoju v aviatsiinykh zaklepkovykh ziednanniakh* [Device for determining the coefficients of resting friction in aircraft riveted joints]. Patent UA, № 155484, 2024. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1787270/#!>. (accessed 12.6.2024).
8. Jaya, A., Tiong, U. H., Mohammed, R., Bil, C., & Clark, G. Corrosion treatments and the fatigue of aerospace structural joints. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, iss. 1, pp. 1523–1529. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2010.03.164.
9. Rebinder, P. A. *Poverhnostnye javlenija v disperstnyh sistemah. Fiziko-himicheskaja mehanika. Izbrannye trudy* [Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical mechanics. Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 384 p.
10. Karpenko, G. V. *Vlijanie aktivnyh zhidkih sred na vynoslivost' stali* [The impact of active liquid media on the endurance of steel]. Kyiv, Publ. AS USSR, 1955. 207 p.
11. Nikol's, H., & Rostoker, U. *Hrupkoe razrushenie stali v prisutstvii organicheskikh zhidkostej. Chuvstvitel'nost' mehanicheskikh svoystv k dejstvu sredy* [Brittle fracture of steel in the presence of organic liquids. Sensitivity of mechanical properties to environmental exposure]. Moscow, Mir Publ., 1969, pp. 121-128.
12. Pejkowski, Ł., Karuskevich, M., & Maslak, T. Extrusion/intrusion structure as a fatigue indicator for uniaxial and multiaxial loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2019, vol. 42, iss. 10, pp. 2315-2324. DOI: 10.1111/ffe.13066.
13. Lihtman, V. I. *Fiziko-himicheskie javlenija pri deformacii metallov* [Physical-chemical phenomena during the deformation of metals]. *Uspehi fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences*, 1954, vol. 54 (4), pp. 587-618. DOI: 10.3367/UFNr.0054.195412d.0587.
14. Schijve, J., Campoli, G., & Monaco, A. Fatigue of structures and secondary bending in structural elements. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, pp. 1111–1123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.01.009.
15. Freed, Y., Machnes, L. S., & Magidish, O. *Analytical and Numerical Investigation of the Effect of Secondary Bending in Hard-Point Joints. 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue: ICAF 2019 – Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing*, Krakow, Poland, 2019, pp. 159-175. DOI: 10.1007/978-3-030-21503-3_13.

A COMPLEX APPROACH TO THE SELECTION OF FILM-FORMING ANTI-CORROSION COMPOUNDS FOR THE PROTECTION AVIATION STRUCTURES AGAINST CORROSION

*Ievgen Gavrylov, Sergiy Ignatovych, Mykhailo Karuskevych,
Tetiana Maslak, Oleg Karuskevych*

This paper considers substantiated by experiments the selection of corrosion-preventing compounds for aircraft structures protection. The influence of corrosion-preventing compounds on the service life of typical riveted joints used in fuselages of planes of the transport category was studied. It was found that corrosion-preventing compounds penetrate the gaps of joints and influence the fatigue life under certain conditions. Based on the hypothesis regarding the influence of friction between the mating elements of joints on fatigue damage and fracture, a device to measure the static friction force between the joined elements in the presence of corrosion-preventing compounds was developed. An experimental study on the influence of an aviation corrosion-preventing compound on the friction forces was conducted. Finite Elements Analysis of the effect of corrosion-preventing compounds on the strain-stress state of the riveted joint elements was conducted. Results of the research on the negative side effects caused by the application of corrosion-preventing compounds are summarized. A study of the fatigue life of riveted joints after treatment with corrosion-preventing compounds, Finite Elements Analysis of the stress-strain state, and determination of the influence on friction are considered as primary components of the complex method for controlling corrosion-preventing compounds. Additional components of the complex method for the study of corrosion-preventing compounds were described. They extend the number of compounds characteristics. Additional components of the complex method are: determination of the influence of preventing compounds on the nucleation stage of fatigue damage, which can be conducted by the parameters of the surface deformation relief; the study of the influence of preventing compounds on fatigue crack propagation stage using linear fracture mechanics approaches; and the determination of the influence of preventing compounds on the secondary bending effect. A structural and logical scheme for assessing the negative side effects of corrosion-preventing compounds is proposed.

Keywords: corrosion; aviation structures; service life; rivets joints; friction; friction coefficient; contact stresses; protection against corrosion; side effects.

Гаврилов Євген Павлович – виконувач обов'язків генерального директора АТ «АНТОНОВ», Київ, Україна.

Ігнатович Сергій Ромуальдович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Карускевич Михайло Віталійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Маслак Тетяна Петрівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Карускевич Олег Михайлович – канд. техн. наук, докторант, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Ievgen Gavrylov – Acting Head of the Joint Stock ANTONOV, Kyiv, Ukraine,
e-mail: ievgengavrylov@ukr.net, ORCID: 0009-0007-2240-5198, Scopus Author ID 57366196400.

Sergiy Ignatovych – Doctor of Science, Professor, Professor at the Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: serhii.ignatovych@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9322-2195, Scopus Author ID 6603696962.

Mykhailo Karuskevych – Doctor of Science, Professor, Professor at the Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: mykhailo.karuskevych@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1698-0296, Scopus Author ID 6507854987.

Tetiana Maslak – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Aircraft Design Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: tetiana.maslak@npp.nau.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8320-8613, Scopus Author ID 25823861700.

Oleg Karuskevych – PhD, Doctoral Candidate, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: karuskevych@ukr.net, ORCID: 0009-0009-7496-0075, Scopus Author ID 37007575500.